第38卷 第3期
2021年5月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 3
May 2021

西藏地区潜在蒸散量时空格局特征及影响因素研究

史继清[1]， 豆永丽[2]， 杨霏云[3]， 戴 睿[1]， 胡 军[1]

（1. 西藏自治区气候中心，西藏 拉萨 850000；2. 西藏自治区气象信息网络中心，西藏 拉萨 850000；
3. 中国气象局气象干部培训学院，北京 100081）

摘 要：利用1981—2018年西藏地区38个气象站点的逐日气象观测资料，采用联合国粮农组织Food and Agriculture Organization of the United Nations（FAO）推荐的Penman-Monteith公式估算了各站点的潜在蒸散量（ET_0），分别从趋势性、突变性以及周期性分析了ET_0的时空变化格局及其影响因素。结果表明：在时间尺度上，西藏地区ET_0均表现出先"下降"后"升高"的趋势，其中"下降"阶段ET_0整体呈显著的降低趋势（除冬季外），"升高"阶段呈显著的增加趋势（除春、夏季）。在空间尺度上，春、夏季表现出减少和秋冬季、年际表现出增加的趋势。发生突变的站点主要分布在中南部和东北部区域，时间集中在20世纪80年代；年均ET_0变化的第一主周期为33 a（2013年）。此外，平均风速和相对湿度是影响年及季节ET_0的主要因素，同时平均风速、相对湿度和最高温度对ET_0的影响趋势具有很强的一致性。

关键词：西藏；潜在蒸散量；趋势性；偏相关；影响因素

气候变化是国际社会普遍关注的全球性问题之一，IPCC第五次评估报告中指出，2003—2012年平均温度比1850—1900年平均温度上升了0.78 ℃，将导致极端厄尔尼诺事件频率增加50%[1]，对农牧业生产和社会可持续发展带来巨大威胁。青藏高原作为全球气候系统的一个典型单元，对全球气候变化的响应具有敏感性、超前性和调节性[2-3]。近年来受全球气候变化的影响，青藏高原的气候和水资源方面发生了明显的变化，如气温升高、降水和蒸发增加、冰川与冻土的消融和退缩、湖泊和河流干涸等[4-7]。位于青藏高原西南部的西藏地区，气温升高，部分地区呈现暖干化趋势，也出现了冰川退缩、冻土消融、生态环境退化等问题[8]。

潜在蒸散量ET_0在水循环中直接受土地利用和气候变化的影响[9]，是土壤水分变化的重要指标，对区域气候、水资源及生态状况都有一定的影响。近年来，诸多学者在ET_0及其影响因素方面展开了大量研究，研究表明中国年平均ET_0以0.52 mm·a^{-1}的速率递减[10]，且我国北方、华北平原、青藏高原、黑河流域的ET_0也表现出不同程度的下降趋势[11-14]，但东北地区、三江源地区的ET_0又呈现微弱的上升趋势[15-16]。王鹏涛等[12]、张亚宁等[14]认为日照时数、风速分别是影响华北平原、黑河流域ET_0变化的主导因素，而谢贤群等[11]认为太阳总辐射的下降是导致中国北方ET_0减少的主要原因，吴霞等[10]发现1961—2015年中国ET_0呈减少趋势是由于风速减小、日照时数降低和水汽压微弱增加共同导致，而20世纪90年代以后的增加趋势主要受水汽压、日照时数和最低气温的共同影响。可见，不同区域、不同时间段的ET_0变化特征和影响因素不尽相同。

目前，关于西藏ET_0的研究多侧重局部区域或少数站点，数据序列偏短，且气象因素与ET_0关系的探讨针对性不够深入[17-19]。为此，本文选取西藏地区数据资料较完整的38个气象站点长时间序列（1981—2018年）的逐日气象数据，采用FAO推荐的Penman-Monteith公式[20]估算各站点的ET_0，通过Mann-Kendall趋势检验法、小波分析法，分别从季节尺度和年际尺度对ET_0的变化趋势、突变性以及周

收稿日期：2020-03-12； **修订日期**：2020-05-16
基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0105，2019QZKK0106)；西藏自治区自然科学基金（XZ202001ZR0033G）；西藏自治区科技计划项目（XZ202001ZY0023N）
作者简介：史继清（1988-），女，工程师，硕士研究生，从事农业气象灾害与遥感方面的研究. E-mail: 549923050@qq.com
通讯作者：胡军. E-mail: 2462509297@qq.com

期性进行了分析,并利用SPSS中的偏相关分析进一步探讨了该地区影响ET_0变化的主要气象因素,以期为西藏水资源的评价及管理提供参考依据和理论支撑。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

西藏位于中国青藏高原西南部,平均海拔4000 m以上,素有"世界屋脊"和"地球第三极"之称。地理位置为78°25′~99°06′E,26°50′~36°53′N,年平均气温为-2.4~12.1 °C,年日照时数为1443.5~3574.3 h,水资源丰富,气温低,积温少,昼夜温差大。由于受西风带天气系统和印度洋暖湿气流的强烈影响,干湿季明显,加之境内高山林立,地形地貌复杂多样,各地气候差异较大,易出现区域性干旱、雪灾、洪涝等灾害性天气,严重影响其农牧业发展及水资源优化配置[20]。

1.2 数据来源

气象数据采用西藏气象局提供的1981—2018年西藏地区38个气象站点的逐日气象数据(图1),包括平均气温、最高气温、最低气温、平均风速、日照时数和平均相对湿度。其中,气候站点涵盖22个国家基本气象站、6个国家基准气象站和10个国家一般气象站。

1.3 研究方法

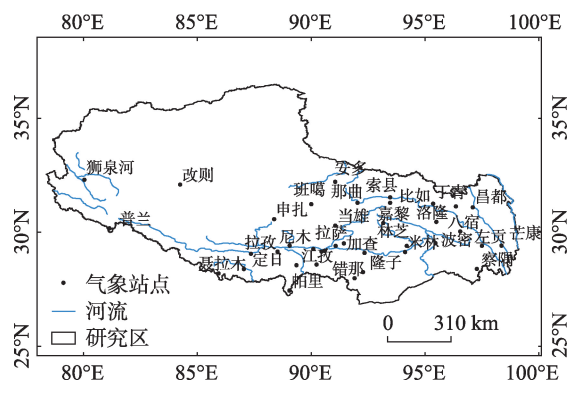
1.3.1 *潜在蒸散量的计算* 潜在蒸散量ET_0由联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的Penman-Monteith公式计算,以能量平衡和水汽扩散理论为基础,既考虑了作物的生理特征,又考虑了空气动力学参数的变化,该模型适用于湿润和干旱等各种气候条件地区[16]。Penman-Monteith修正公式如下:

$$ET_0=\frac{0.408\Delta\left(R_n-G\right)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2\left(e_s-e_a\right)}{\Delta+\gamma\left(1+0.34U_2\right)} \quad (1)$$

式中:ET_0为潜在蒸散量;R_n表示地表净辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1});G为土壤热通量(MJ·m^{-2}·d^{-1});U_2为2 m高处风速(m·s^{-1});e_s为饱和水汽压(kPa);e_a为实际水汽压(kPa);Δ为饱和水汽压曲线斜率(kPa·℃$^{-1}$);γ为干湿表常数(kPa·℃$^{-1}$)。

1.3.2 *插值方法* 考虑到研究区站点少且分布不均等因素,选择合适的插值方法获取空间尺度上的连续数据是十分必要的。本文选择常见的克里金(Kriging)、反距离加权(IDW)和样条函数(Spline)插值方法,分别通过均方根误差(RMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)和平均相对误差(MRE)验证上述各插值模型结果的优劣性[21]。随机选取28个气象站作为插值站点,其余气象站作为验证站点。由表1可知,Kriging插值计算出的各种误差值最小,因此本文选用Kriging进行潜在蒸散量ET_0的插值计算。

1.3.3 *偏相关分析* 根据Penman-Monteith公式可计算出潜在蒸散量ET_0主要受到气象因素(气温、风速、相对湿度和日照时数)的影响,如何判断ET_0与主要气象因素的关联程度是本文待解决的问题。考虑到简单相关分析不能真实地反映ET_0与单一气象因素的相关联系,而偏相关分析可以在研究两个变量之间的线性相关关系时控制可能对其产生影响的变量,从而消除了其他气象因素关联性的传递



注:审图号为藏S(2021)007号。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of study area

表1 不同插值方法计算结果

Tab. 1 Results of different interpolation methods

插值方法	误差方法	误差结果
Kriging	RMSE	6.27
	MAPE	43.79
	MRE	0.34
IDW	RMSE	7.49
	MAPE	49.13
	MRE	0.44
Spline	RMSE	7.69
	MAPE	52.97
	MRE	0.85

效应[22]。偏相关系数的绝对值越大,表示其偏相关程度越强。

2 结果与分析

为了验证Penman-Monteith公式在西藏地区的适用性,利用实测的小型蒸发皿蒸发量(PE)与计算的潜在蒸散量(ET_0)进行相关性分析发现(图2),月尺度的PE与ET_0的相关系数对38个气象站均通过0.01的显著性检验(除聂拉木外),其中相关系数均值为0.6($P<0.01$),这与刘波[23]指出青藏高原参考作物蒸散与蒸发皿蒸发的相关系数为0.67的结果较一致。

2.1 潜在蒸散量ET_0的时空变化特征

2.1.1 ET_0的时间变化特征 利用ET_0距平、5 a滑动平均和线性回归分析法,分别从季节尺度和年际尺度分析1981—2018年西藏地区ET_0的变化趋势(图3),采用Mann-Kendall趋势检验分析其显著性。季节、年际尺度下,西藏地区ET_0均表现为先"下降"后"升高"的变化趋势,分别在21世纪初期(图3a,3b,3d,3e)和1999年(图3c)发生转折。ET_0处在"下降"趋势下,夏季、秋季、年际的统计量Z值分别为-4.34、-3.64、-3.21,绝对值均>2.58($P_{0.01}$=2.58),春季统计量Z值为-2.26,且绝对值>1.96($P_{0.05}$=1.96),表明ET_0整体呈现出夏季、秋季、年际非常显著和春季显著的降低趋势,而冬季(Z=0.53)呈现不显著的

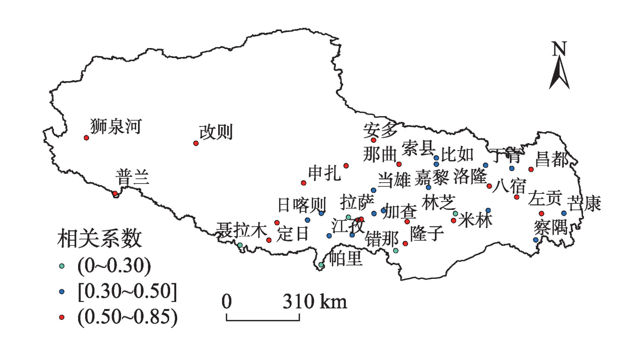


图2 1981—2018年月尺度实测小型蒸发皿蒸发量(PE)与计算潜在蒸散量(ET_0)的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between measured and calculated the evaporation of small evaporating pans on a monthly scaleand calculated potential evapotranspiration (ET_0) in Tibet from 1981 to 2018

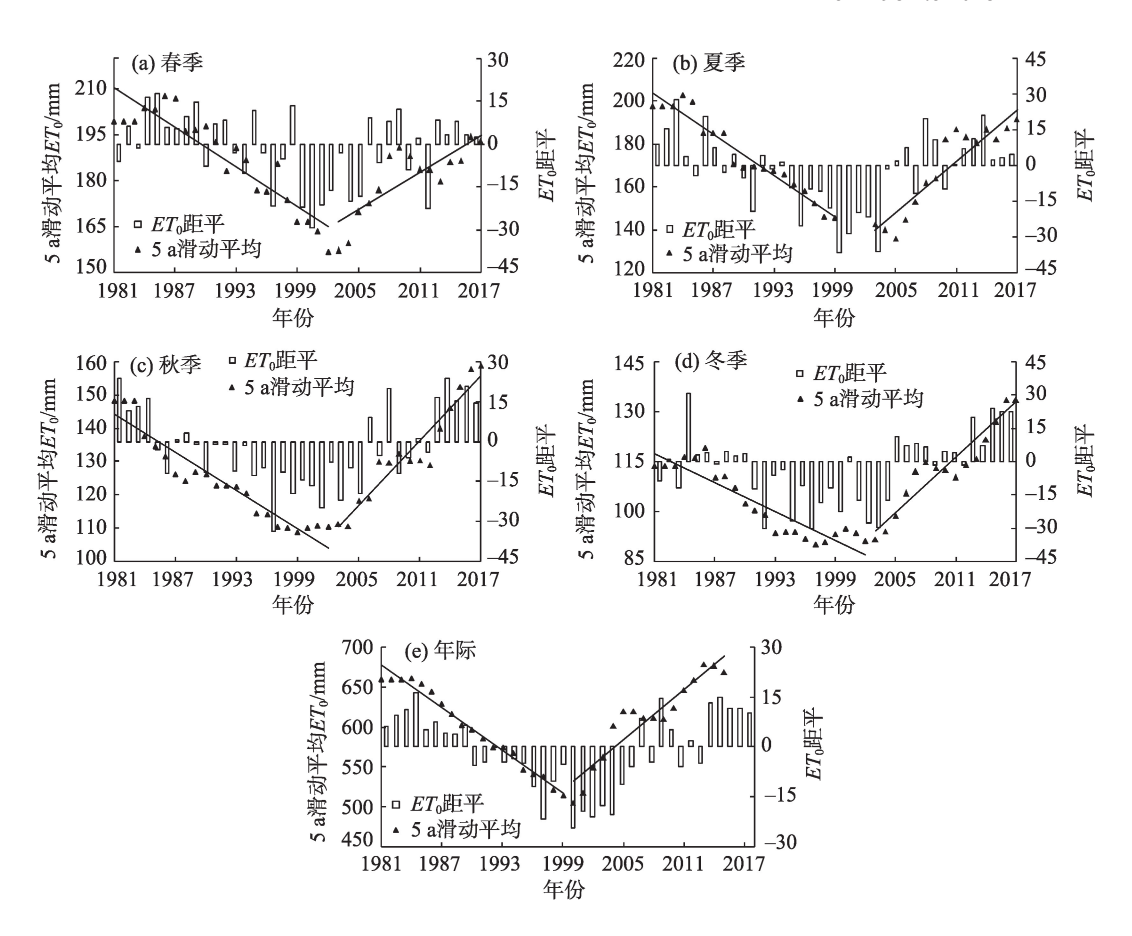


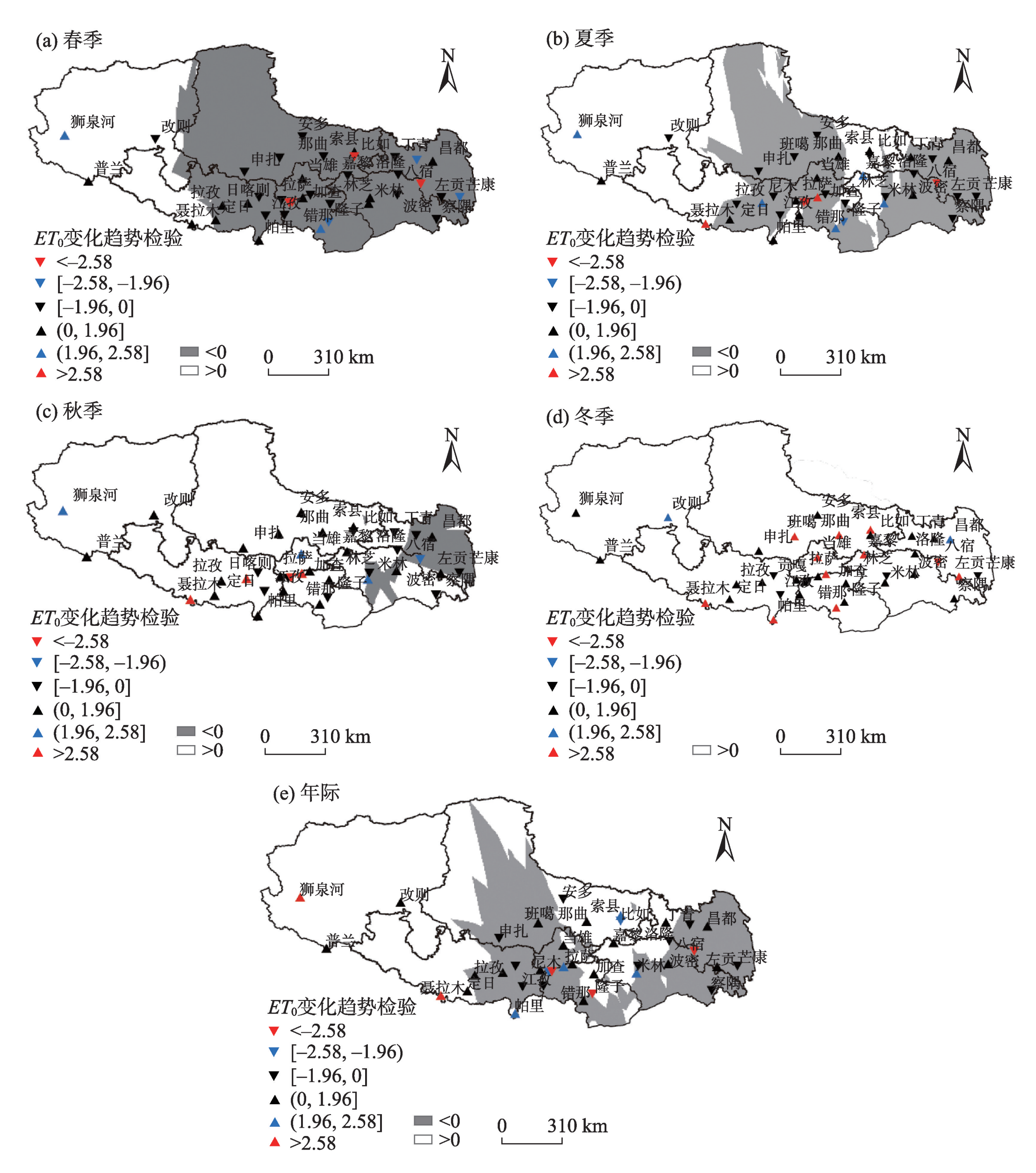
图3 1981—2018年西藏地区不同季节和年际的潜在蒸散量(ET_0)及其距平变化

Fig. 3 Changes of ET_0 and its anomalies in Tibet during different seasons and year scale from 1981 to 2018

增加趋势，这与卓嘎等[19]对藏北ET_0的分析结果相一致。ET_0处在“升高”趋势下，秋季、年际的统计量Z值分别为3.5、2.75，均＞2.58，冬季统计量Z值为2.39(＞1.96)，表明ET_0整体呈现出秋季、年际非常显著和冬季显著的增加趋势，而春、夏季(Z值分别为1.13、1.53)则表现出不显著的增加趋势。

此外，西藏地区年尺度ET_0在2002年前减少非常显著，加之降水量(Z=2.37)呈显著增加趋势，说明该区域表现为明显的暖湿化走势，这与金建新等[24]和唐小萍等[25]对西藏地区降水量的分析结果相一致；2002年之后ET_0增加较显著，而降水量(Z=0.14)呈微弱的增加趋势，表明ET_0远超降水量的增加速度，故西藏地区呈暖干化趋势，这与张娜等[26]对西藏ET_0的研究结论基本吻合，即ET_0累计距平在1981—1989年处于高蒸散阶段，1989年后处于低蒸散阶段，2005年起又持续回升。

2.1.2　ET_0的空间变化特征　西藏地区ET_0春夏季和秋冬季均呈现出不同程度的减少和增加趋势。春季，大部分地区ET_0表现为减少趋势，主要分布在西藏中东部区域，局部减少显著(P≤0.05)(图4a)；夏



注：|ET_0变化趋势检验|＞2.58表示增加或减少非常显著，1.96＜|ET_0变化趋势检验|≤2.58表示增加或减少显著，|ET_0变化趋势检验|＜1.96表示增加或减少不显著。

图4　1981—2018年西藏地区各站点ET_0在不同季节和年际变化趋势检验的空间分布

Fig. 4　Site distribution of the change trend test of ET_0 in different seasons and interannual in each stations in Tibet from 1981 to 2018

季ET_0整体仍表现为减少趋势，位于那曲中部、东部和南部边缘（图4b）；秋季80%以上区域ET_0呈增加趋势，集中分布在中西部区域，局部增加显著（图4c）；冬季ET_0呈增加趋势的区域几乎覆盖整个区域，有31%的区域呈显著增加趋势，位于中部和南部边缘区域（图4d）。年际尺度下，西藏地区ET_0整体呈现增加态势，显著及非常显著增加的区域占25%，分布在阿里西部和日喀则南部区域（图4e）。

2.2 ET_0突变及周期特征

利用Mann-Kendall方法对研究区38个气象站点进行突变分析，并结合滑动T-检验和Yamamoto方法进行校验（图5），增强突变分析结果的可信度。针对滑动T-检验和Yamamoto两种校验方法，均选取$n_1=n_2=5$，结果表明发生2次突变的有那曲和当雄共2个站点，发生1次突变的站点最多，共20个，没有发生突变的站点有16个。发生突变的站点主要分布在西藏中南部和东北部区域，未发生突变的站点主要集中在那曲中西部。

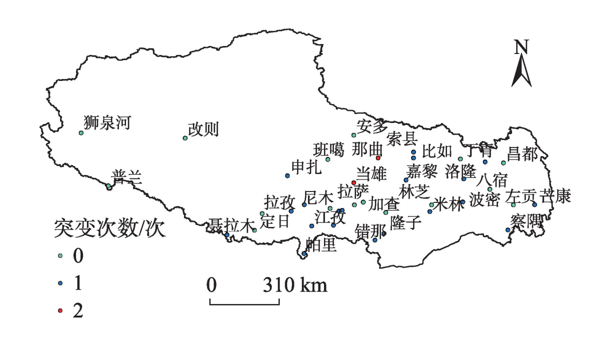


图5 西藏地区ET_0的气象站点突变分布

Fig. 5 Abrupt distribution of weather stations of ET_0 in Tibet

采用小波分析法分析近40 a来西藏地区年际尺度ET_0的周期性变化（图6）。20世纪80年代至90年代初，大的伸缩尺度为正值，说明这一时期ET_0偏大；90年代中期至2005年伸缩尺度为负值，对应这段时期ET_0总体偏小，2005年后ET_0又开始偏大，小波变换的结果与图3e所反映的年际ET_0变化趋势一致。结合小波方差（图6b）检验确定年际ET_0在33 a周期上达最高小波方差，即为第一主周期。

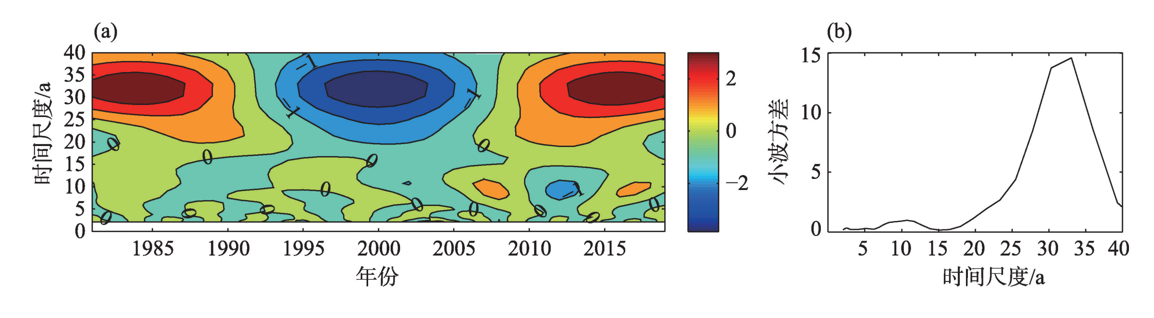


图6 西藏ET_0年际尺度的Morlet小波变换实部分布及小波方差

Fig. 6 Real part time-frequency distribution and wavelet variance of Morlet wavelet transform at the interannual scale of ET_0 in Tibet

2.3 主要气象因素对ET_0的影响

风速、相对湿度、最高温度、最低温度、平均温度和太阳辐射等气象要素是影响ET_0变化的最直接因素，不同气象要素之间也相互影响，导致ET_0变化成因复杂。为明确影响ET_0变化的主导气象因素，采用偏相关分析法分析西藏地区ET_0与风速等6个气象因素的关系，结果见表2。由表可知，西藏ET_0与平均风速、最高温度、最低温度、平均温度和日照时数呈正相关，与相对湿度呈负相关，这与张娜等[26]对西藏ET_0的研究结果相近。不同时间、不同空间尺度的ET_0影响因素存在一定的差异。

不同时间尺度下，平均风速和相对湿度均是影响西藏ET_0变化的主导气象因素，这与卓嘎等[19]研

表2 西藏不同时间尺度下ET_0与主要气象因素偏相关关系

Tab. 2 Prtial correlation between ET_0 and main meteorological elements under different time scales in Tibet

气象要素	时间尺度				
	春季	夏季	秋季	冬季	年际
WS	0.797**	0.821**	0.813**	0.791**	0.754**
RH	−0.700**	−0.708**	−0.709**	−0.558**	−0.605**
T_{max}	0.239**	0.212**	0.217**	0.254**	0.187**
T_{min}	0.094**	0.115**	0.053	0.021	0.041
T_{ave}	0.058	0.033	0.046	0.125**	0.061
SD	0.018	0.048	0.035	0.037	0.099**

注：WS表示风速；RH表示相对湿度；T_{max}、T_{min}、T_{ave}分别表示最高、最低、平均温度；SD表示日照时数；**表示$P<0.01$；*表示$P<0.05$。

究西藏西北部年ET_0的结论一致。影响不同季节、年际ET_0的主要气象因素(除主导气象要素)有所不同,春夏季ET_0与最高温度、最低温度显著正相关,冬季ET_0与最高温度、平均温度显著正相关,年际ET_0与最高温度、日照时数显著正相关。分析ET_0和影响ET_0的主要气象因素多年变化趋势来看,近年来平均气温、最低气温和最高气温呈上升趋势,日照时数、平均风速和相对湿度呈减小趋势[27],虽然平均风速和日照时数的变化有助于ET_0的减少,但加上最高气温和相对湿度的变化最终导致了ET_0的微弱增加。

基于研究区域气象站点太多,故选取西藏不同气候区域的代表性气象站[21]进行平均风速、相对湿度和最高气温的月际变化特征分析(图7)。不同空间尺度下,平均风速、相对湿度和最高温度对ET_0的影响趋势具有很强的一致性,以夏季索县、狮泉河为例,平均风速、相对湿度和最高温度虽是影响ET_0的最主要因素,但其值远小于其他气象站(图略)。虽然平均风速是影响整个研究区ET_0的首要因素,但也有个别站点例外,如冬季的聂拉木、错那相对湿度是影响ET_0的最主要因素,原因在于冬季ET_0较其他季节最小,且较其他气象站点风速最大(图7a)、相对湿度明显较高(图7b),使得相对湿度对ET_0的影响占主导因素。

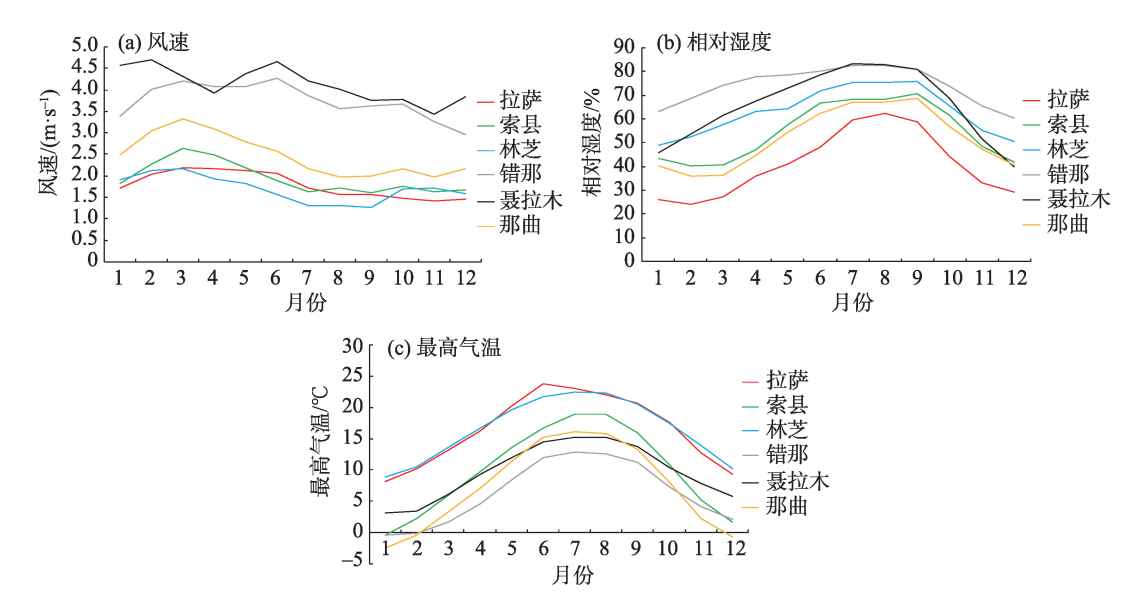


图7 气候区域代表站风速、相对湿度和最高气温的月变化特征

Fig. 7 Monthly variation characteristics of wind speed, relative humidity and maximum temperature of representative stations in climatic regions

3 讨论

如何准确估算潜在蒸散量有多种方法[28],本文采用Penman-Monteith公式分别从季节尺度和年际尺度对潜在蒸散量ET_0的变化趋势、突变性以及周期性进行了分析,并进一步探讨了该地区影响ET_0变化的主要气象因素。统计分析发现,在时间尺度上西藏地区(1981—2018年)与整个青藏高原[13](1970—2010年)的变化趋势较一致,即前20 a(西藏1981—2000年、青藏高原1970—1990年)ET_0减少、后20 a(西藏2001—2018年、青藏高原1991—2010年)ET_0增加;但变化趋势上却有所不同,即前20 a ET_0减少均出现在春夏季,后20 a ET_0增加出现季节相反(西藏地区出现在秋冬季,而青藏高原出现在春夏季),究其原因谢虹[13]采用75个气象站点中仅涉及西藏22个站,且时间序列有别于本研究,故造成研究结果有所差异。

1981—2018年西藏地区呈先暖湿化后暖干化的趋势,这与毛飞等[29]研究青藏高原湿润气候区和半干旱气候区的结论较一致。张娜等[26]学者发现1981—2012年西藏地区ET_0整体呈减小趋势,与本研究在相同时间段的研究结论一致,而增加时间序列至2018年,ET_0呈现微弱的增加趋势,气候倾向率为0.983 mm·$(10a)^{-1}$。平均风速和相对湿度对ET_0的

影响程度最高，主要由于西藏多大风天气，西部和北部大风日数高达100~160 d，这与谢虹[13]研究青藏高原蒸散发的结论相吻合；同时西藏属于高寒地区，整体相对湿度较小(图7b)，ET_0呈现基本增大趋势(图4)，且相对湿度与Penman-Monteith公式的实际水汽压项联系紧密。

4 结 论

本文基于FAO推荐的Penman-Monteith公式估算了西藏地区逐日潜在蒸散量(ET_0)，深入分析了ET_0的时空变化趋势、转折特征、周期性变化及其归因，结论如下：

(1) 西藏地区ET_0在2002年发生转变，由“下降”趋势转为“上升”趋势。1981—2002年ET_0的减少表现在春季、夏季、秋季和年际；2003—2018年ET_0的增加表现在秋季、冬季和年际。空间尺度下，西藏地区ET_0秋冬季表现出增加趋势、春夏季表现出减少趋势；年际趋势检验38个气象站点中24个为上升趋势，14个为下降趋势，且以中部区域上升为主。

(2) 西藏地区ET_0从20世纪80年代之后开始发生突变，但各站点发生突变次数存在差异。其中那曲和当雄站均发生2次突变，其余气象站发生一次或未发生突变，且发生突变的站点主要分布在西藏中东部。近40 a来西藏地区ET_0存在明显的周期震荡特征，在33 a和8 a存在两个明显的峰值，分别对应第一、二主周期。

(3) 年均ET_0与各气象因素的偏相关系数绝对值大小依次为：平均风速 > 相对湿度 > 最高气温 > 日照时数 > 平均气温 > 最低气温，其偏相关系数分别为0.754、-0.605、0.187、0.099、0.061、0.041。不同时间尺度下，平均风速和相对湿度均是影响西藏ET_0变化的主导气象因素，但不同时空尺度的ET_0影响因素有所差异。

参考文献(References)：

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: The Summary for Policymakers of the Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.

[2] Immerzeel W W, Beek van L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328 (5984): 1382-1385.

[3] Krause P, Biskop S, Helmschrot J, et al. Hydrological system analysis and modelling of the Nam Co Basin in Tibet[J]. Advances in Geosciences, 2010, 27: 29-36.

[4] Du M Y, Kawashima S, Yonemura S, et al. Mutual influence between human activities and climate change in the Tibetan Plateau during recent years[J]. Global and Planetary Change, 2004, 41(3-4): 241-249.

[5] Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(14): 63-72.

[6] 李志斐. 气候变化对青藏高原水资源安全的影响[J]. 国际安全研究, 2018, 36(3): 42-63, 157. [Li Zhifei. Impact of climate change on water resources security on the Tibetan Plateau[J]. International Security Research, 2018, 36(3): 42-63, 157.]

[7] 达瓦次仁. 全球气候变化对青藏高原水资源的影响[J]. 西藏研究, 2010, 30(4): 90-99. [Dawa Ciren. Impacts of global warming on the water resources of Tibetan Plateau[J]. Tibetan Studies, 2010, 30(4): 90-99.]

[8] 王娜. 对构建西藏生态安全屏障的几点思考[J]. 西藏发展论坛, 2011, 30(3): 43-46. [Wang Na. Some thoughts on the construction of ecological security barrier in Tibet[J]. The Theoretical Platform of Tibetan Development, 2011, 30(3): 43-46.]

[9] Gu L, Hu Z, Yao J, et al. Actual and reference evapotranspiration in a cornfield in the Zhangye Oasis, northwestern China[J]. Water, 2017, 9(7): 499.

[10] 吴霞, 王培娟, 霍治国, 等. 1961—2015年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 964-977. [Wu Xia, Wang Peijuan, Huo Zhiguo, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in China from 1961 to 2015[J]. Resources Science, 2017, 39(5): 964-977.]

[11] 谢贤群, 王菱. 中国北方近50年潜在蒸发的变化[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 683-691. [Xie Xianqun, Wang Ling. Changes of potential evaporation in northern China over the past 50 years [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 683-691.]

[12] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 等. 华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5589-5599. [Wang Pengtao, Yan Junping, Jiang Chong, et al. Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in the north China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5589-5599.]

[13] 谢虹. 青藏高原蒸散发及其对气候变化的响应(1970—2010) [D]. 兰州: 兰州大学, 2012. [Xie Hong. The Evapotranspiration and its Response to Climate Change on the Tibetan Plateau(1970-2010)[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]

[14] 张亚宁, 张勃, 王亚敏, 等. 1960—2008年黑河流域参考作物蒸发蒸腾量的时空变化[J]. 干旱区地理, 2011, 34(4): 779-787. [Zhang Yaning, Zhang Bo, Wang Yamin, et al. Temporal and spatial changes of reference crop evapotranspiration in the Heihe Riv-

er Basin from 1960 to 2008[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(4): 779−787.]

[15] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 近60年来东北参考作物蒸散量时空变化[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 194−200. [Zeng Lihong, Song Kaishan, Zhang Bai, et al. Temporal and spatial changes of reference crop evapotranspiration in Northeast China in the past 60 years[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 194−200.]

[16] 周秉荣, 李凤霞, 肖宏斌, 等. 三江源区潜在蒸散时空分异特征及气候归因[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2068−2077. [Zhou Bingrong, Li Fengxia, Xiao Hongbin, et al. Charcteristics and climate explanation of spatial distribution and temporal variation of potential evapotranspiration in headwaters of the Three Rivers[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2068−2077.

[17] 唐小萍, 罗礼洪, 卓玛, 等. 气候变化对西藏雅鲁藏布江中游地区潜在蒸散量的影响分析[J]. 高原山地气象研究, 2011, 31(3): 49−53. [Tang Xiaoping, Luo Lihong, Zhuo Ma, et al. Impact analysis of climate change on potential evapotranspiration over midstream of Yarlung Zangbo River in Tibetan Plateau[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2011, 31(3): 49−53.]

[18] 杜军, 边多, 拉巴, 等. 1971—2005年西藏主要农区农田蒸散量变化特征及其与环境因子的关系[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 815−821. [Du Jun, Bian Dor, Lhak Pa, et al. Changes in evapotranspiration in the main agriculture areas of central Tibet and its relation to the environment factors in 1971−2005[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5): 815−821.]

[19] 卓嘎, 尼玛央珍, 唐小萍. 1980—2009年西藏西北部潜在蒸散时空分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 698−707. [Zhuo Ga, Nima Yangzhen, Tang Xiaoping. Spatiotemporal distribution of potential evapotranspiration and its affecting factors in Northwest Tibet during the period of 1980−2009[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 698−707.]

[20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998: 56.

[21] 黄会平, 曹明明, 宋进喜, 等. 1957—2012年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 315−326. [Huang Huiping, Cao Mingming, Song Jinxi, et al. Spatio-temporal variation of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(2): 315−326.]

[22] 曹静, 阿拉木萨. 科尔沁沙地西部蒸发皿蒸发量变化及其影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 418−424. [Cao Jing, Ala Musa. Variation of pan evaporation and its influencing factors in western Horqin Sandy land [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 418−424.]

[23] 刘波. 近四十年中国蒸发皿蒸发变化与气候变化的关系及潜在蒸散的估算[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005. [Liu Bo. The Relationship between Pan Evaporation and Climate Change in China in the Past four decades and the Estimation of Potential Evapotranspiration[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2005.]

[24] 金建新, 张娜, 桂林国. 西藏地区干旱指标的时空演变[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 377−380. [Jin Jianxin, Zhang Na, Gui Linguo. Temporal and spatial variations of the drought index to the Tibetan Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 377−380.]

[25] 唐小萍, 丹增顿珠, 格桑, 等. 近46 a西藏农区作物生长季气候变化特征及突变分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 249−254. [Tang Xiaoping, Danzeng Dunchu, Ge Sang, et al. The character of climate change and abruption analysis of crop growth season in Tibet in recent 46 years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(5): 249−254.]

[26] 张娜, 金建新, 佟长福, 等. 西藏参考作物蒸散量时空变化特征与影响因素[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1027−1034. [Zhang Na, Jin Jianxin, Tong Changfu, et al. Spatiotemporal variation of evapotranspiration of referred crops and the affecting factors in Tibet[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1027−1034.]

[27] 杜军. 西藏气候变化监测公报(2018年)[M]. 北京: 气象出版社, 2019. [Du Jun. Tibet Climate Change Monitoring Bulletin (2018) [M]. Beijing: Meteorological Press, 2019.]

[28] 曹永强, 刘明阳, 李元菲, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性分析[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1780−1790. [Cao Yongqiang, Liu Mingyang, Li Yuanfei, et al. Applicability of six potential evapotranspiration methods in Liaoning Province[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1780−1790.]

[29] 毛飞, 唐世浩, 孙涵, 等. 近46年青藏高原干湿气候区动态变化研究[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 499−507. [Mao Fei, Tang Shihao, Sun Han, et al. A study of dynamic change of dry and wet climate regions in the Tibeteau Plateau over the last 46 years [J]. Climate Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(3): 499−507.]

Temporal and spatial pattern characteristics of potential evapotranspiration in Tibet and its influencing factors

SHI Jiqing[1], DOU Yongli[2], YANG Feiyun[3], DAI Rui[1], HU Jun[1]

(1. Tibet Climate Center, Lhasa 850000, Tibet, China; 2. Information and Internet Center of Tibet Meteorological Bureau, Lhasa 850000, Tibet, China; 3. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: This study estimated potential evapotranspiration (ET_0) from 38 meteorological stations in Tibet. We collected the data from daily observations from 1981 to 2018 and analyzed it using the FAO's Penman-Monteith formula. The temporal and spatial patterns of ET_0 and its influencing factors were analyzed separately from trend, sudden change, and periodicity. This study showed that within the time frame, ET_0 in Tibet decreased and then increased, and there was a significant decrease (except winter) and increase (except spring and summer). Spatially, there was a significant decrease during spring and summer, while in autumn, winter, and interannual, there was a significant increase. The mutation sites were mainly in the South-Central and North Eastern regions, and the time concentration was in the 1980s. The first major cycle of annual average ET_0 change may be 33 a (2013 year). Also, average wind speed and relative humidity were the dominant ET_0 factors in the years and seasons. Simultaneously, the influence trend of average wind speed, relative humidity, and maximum temperature on ET_0 was consistent.

Keywords: Tibet; potential evapotranspiration; tendency; partial correlation; influencing factors